

# 孤立信号交差点における遅れ時間最小化と CO<sub>2</sub> 排出量最小化制御の相違\*

## The difference between signal controls for minimizing total delay and CO<sub>2</sub> emission at isolated intersection\*

西内 裕晶\*\*, 吉井 稔雄\*\*\*

By Hiroaki NISHIUCHI\*\*, Toshio YOSHII \*\*\*

### 1. はじめに

信号交差点における信号制御パラメータは、安全上の問題を考慮しながら、各車両の遅れ時間を小さくすることを主たる目的として設定されている。一方で、遅れ時間を最小化することが排出量の最小化とほぼ同じであるとの見解もあって、自動車排出ガスの軽減を明確に考慮した信号制御は一般化されていないのが現状である。しかしながら、現実には遅れ時間最小化と CO<sub>2</sub> 排出量最小化では制御方法が異なることが報告されている<sup>1)</sup>。そこで本稿では、最も単純な状況を想定し、交差点飽和度や損失時間との関係において、いかなる状況下でその制御方法が異なるのかについて解析を行った。

- $g_i$  : アプローチ  $i$  に通行権が与えられる現示の有効青時間 [sec]
- $L$  : 損失時間 ( $L = l_1 + l_2$ ) [sec]
- $C$  : サイクル長 [sec]
- $Q_i$  : アプローチ  $i$  の交通量 [veh/hour]
- $S_i$  : アプローチ  $i$  の飽和交通流率 [veh/hour]

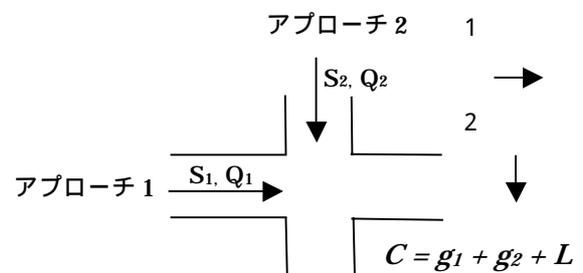


図1 対象とする信号交差点

### 2. 本研究の考え方

#### (1) 対象とする交差点と交通量

本研究では、最も解析が単純であると考えられる交差点として、以下に示す条件の孤立交差点を対象とする(図1参照)。

- a) 一方通行が交差する4枝交差点
- b)  $S_1 = S_2 = S$
- c)  $Q_1 = Q_2 = Q < S$  , かつ一様到着
- d) 待ち行列は point queue を想定

\*キーワード：信号制御，交通公害

\*\*学生員，京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

\*\*\*正員，博士(工学)，京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻(京都市左京区吉田本町，

TEL:075-753-5135，FAX:075-753-5916

E-Mail:yoshii.term.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

ここで，

#### (2) CO<sub>2</sub> 排出量の算出方法

##### a) CO<sub>2</sub> 排出量算出式

CO<sub>2</sub> 排出量の算出には大口ら<sup>2)</sup>の提案した式を用いる。

$$E = 0.3 \cdot K_c \cdot T + 0.028 \cdot K_c \cdot D + 0.058 \cdot K_c \cdot AEE \quad (1)$$

$$AEE = \sum_{k=1}^K \sigma_k (v_k^2 - v_{k-1}^2)$$

- $E$  : CO<sub>2</sub> 排出量 [cc]
- $K_c$  : ガソリン燃料消費量を CO<sub>2</sub> 排出量に変換する変換係数
- $T$  : 旅行時間 [sec]
- $D$  : 走行距離 [m]
- $AEE$  : 加速エネルギー当量 [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]
- $\sigma_k$  : 加速時  $\sigma_k = 1$ 、その他の場合  $\sigma_k = 0$
- $v_k$  : 時刻  $k$  における瞬間速度 [m/s]

第二項は走行距離に関係する項であり、この値は対象とする区間を決定すれば定数となる。第三項は車速変動特性に関係する項であり、走行パターン別に決定する。

b) AEE 値

AEE 値は、プローブカーから得られる速度データに基づいて算出する。具体的には停止回数別に平均値を算出し、その平均値を定数として与える。停止線において停止しなかった場合の AEE 値を  $\mu_0$ 、1 回停止した場合を  $\mu_1$  とし、以下  $n$  回停止した場合を  $\mu_n$  とする。なお本研究で設定した条件下（非飽和，一様到着）では、2 回以上停止する状況は発生しない。

3. 遅れ時間最小化制御と CO<sub>2</sub> 排出量最小化制御

(1) 遅れ時間最小化

先に示した本研究で想定する条件 b),c) より，遅れ時間を最小とするサイクル長  $C_{min}$  は，

$$C_{min} = \frac{L}{1-\lambda} \quad (2)$$

: 交差点の飽和度

となり，このとき現示  $i$  の有効青時間  $g_{delay}^i$  は，

$$g_{delay}^1 = g_{delay}^2 = g_{delay} = \frac{L \cdot \lambda}{2 \cdot (1-\lambda)} \quad (3)$$

となる。

(2) CO<sub>2</sub> 排出量最小化

式(1)より，1 サイクルあたりの CO<sub>2</sub> 排出量  $E_{cycle}$  は，

$$E_{cycle} = \sum_{i=1}^2 \left[ \sum_{j=1}^{N_i} 0.3Kc \cdot \{T_{free}^i + T_{delay}(j)\} + 0.028KcD_iN_i + 0.058 \cdot Kc \{ \mu_0^i N_i (1-\theta_i) + \mu_1^i N_i \theta_i \} \right] \quad (4)$$

$$\theta_i = \frac{1}{1-\lambda_i} \cdot \frac{C-g_i}{C} \quad (5)$$

$N_i$ : アプローチ  $i$  に 1 サイクルで到着する車両台数  
[veh/cycle]

$\theta_i$ : アプローチ  $i$  で停止した車両の割合 (図 2 参照)

$\lambda_i$ : 現示  $i$  の飽和度

$T_{free}^i$ : アプローチ  $i$  の対象とする区間における自由  
流旅行時間 [sec]

$T_{delay}(j)$ : 車両  $j$  の遅れ時間 [sec]

$D_i$ : アプローチ  $i$  の対象とする区間の走行距離 [m]

$\mu_k^i$ : アプローチ  $i$  で  $k$  回停止した場合の AEE 値  
[m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]

となる。

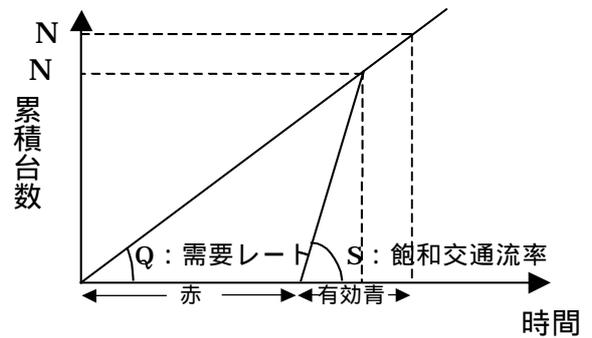


図 2 遅れ時間

ここで，1 サイクルあたりの遅れ時間  $T$  は図 2 中の 3 角形の面積に相当し，

$$T = \frac{1}{2}(C-g) \cdot N \cdot \theta \quad (6)$$

であるから，

$$E_{cycle} = \sum_{i=1}^2 [0.3Kc \{N_i T_{free}^i + \frac{1}{2}(C-g_i)N_i \theta_i\} + 0.028KcD_iN_i + 0.058 \cdot Kc \{ \mu_0^i N_i (1-\theta_i) + \mu_1^i N_i \theta_i \}] \quad (7)$$

となる。さらに，

$$N_i = Q_i C \quad (8)$$

より，単位時間における CO<sub>2</sub> 排出量  $E$  は，

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{C} E_{cycle} \\ &= \sum_{i=1}^2 0.3Kc \cdot \{Q_i T_{free}^i + \frac{1}{2}(C-g_i)Q_i \theta_i\} + 0.028KcD_iQ_i \\ &\quad + 0.058Kc \cdot \{ \mu_0^i Q_i \cdot (1-\theta_i) + \mu_1^i Q_i \theta_i \} \\ &= \sum_{i=1}^2 a_i + b_i \cdot (C-g_i) \cdot \theta_i + c_i \theta_i \end{aligned} \quad (9)$$

ただし，

$$a_i = 0.3KcQ_i T_{free}^i + 0.028KcD_iQ_i + 0.058Kc\mu_0^i Q_i$$

$$b_i = 0.15KcQ_i$$

$$c_i = 0.058KcQ_i \cdot (\mu_1^i - \mu_0^i)$$

となる。

また，対象とする区間長  $D$  を同じ長さを設定し，かつその区間の自由流走行時間が同じであるとすれ

ば,

$$a_1 = a_2 = a, \quad b_1 = b_2 = b, \quad c_1 = c_2 = c \quad (10)$$

となる.

これを最小とするための必要条件は,

$$\frac{\partial E}{\partial g_1} = \frac{\partial E}{\partial g_2} = 0 \quad (11)$$

であり,

$$\frac{\partial E}{\partial g_1} = \frac{1}{(g_1 + g_2 + L)^2} \cdot [b \cdot \{g_1^2 - g_2^2 + 2g_1g_2 + 2g_1L\} - c_1L] = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial E}{\partial g_2} = \frac{1}{(g_1 + g_2 + L)^2} \cdot [b \cdot \{g_2^2 - g_1^2 + 2g_1g_2 + 2g_2L\} - c_2L] = 0 \quad (13)$$

となるので,

$$\frac{\partial E}{\partial g_1} - \frac{\partial E}{\partial g_2} = \frac{1}{(g_1 + g_2 + L)} \cdot [b \cdot \{2 \cdot (g_1 - g_2) \cdot (g_1 + g_2 + L)\}] = 0 \quad (14)$$

より,  $g_1 = g_2$  が排出量最小化のための必要条件となる.

ここで,

$$g_1 = g_2 = g \quad (15)$$

とすると,

$$\frac{\partial E}{\partial g_1} = \frac{\partial E}{\partial g_2} = \frac{1}{(2g + L)^2} \{2b(g^2 + gL) - cL\} = 0 \quad (16)$$

を解いて,

$$g = -\frac{L}{2} \pm \frac{\sqrt{(bL)^2 - 4bcL}}{2b} \quad (17)$$

ここで,  $g \geq g_{delay} > 0$  であるから,

$$g = -\frac{L}{2} + \frac{\sqrt{(bL)^2 - 4bcL}}{2b} \quad (18)$$

となり, CO<sub>2</sub> 排出量を最小とする青時間  $g_{emission}$  は,

$$\begin{cases} g_{emission} = g_{delay} & \text{if } g < g_{delay} \\ g_{emission} = -\frac{L}{2} + \frac{\sqrt{(bL)^2 + 2bcL}}{2b} & \text{if } g \geq g_{delay} \end{cases} \quad (19)$$

となる.

(3) 遅れ時間最小化と排出量最小化の制御方法が異なる条件

$g_{emission} > g_{delay}$  のとき遅れ時間最小化と排出量最

小化の信号制御が異なることになる. すなわち,

$$-\frac{L}{2} + \frac{\sqrt{(bL)^2 - 4bcL}}{2b} > \frac{L \cdot \lambda}{2 \cdot (1 - \lambda)} \quad (20)$$

となり, これを  $\lambda$  について解くと,

$$\begin{aligned} \lambda < 1 - \sqrt{1 + \frac{4 \cdot c}{b \cdot L - 4 \cdot c}} \quad \text{or} \\ \lambda > 1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot c}{b \cdot L - 4 \cdot c}} \end{aligned} \quad (21)$$

さらに,  $0 \leq \lambda \leq 1$  であるから,

$$0 \leq \lambda < 1 - \sqrt{1 + \frac{4 \cdot c}{b \cdot L - 4 \cdot c}} \quad (22)$$

が遅れ時間最小化と排出量最小化の信号制御が異なる条件となる.

#### 4. CO<sub>2</sub> 排出量最小化の制御による効果

ここでは, CO<sub>2</sub> 排出量最小化制御による効果について考察する.

図3は, 損失時間  $L$  と飽和度  $\lambda$  との関係において, 制御が異なる状況を示したものである. なおグラフ作成の際に必要な  $\mu_0, \mu_1$  の値は, 文献1での調査から得た以下の数値を用いている.

$$\mu_0 = 596 \quad [m^2 / \text{sec}^2]$$

$$\mu_1 = 694 \quad [m^2 / \text{sec}^2]$$

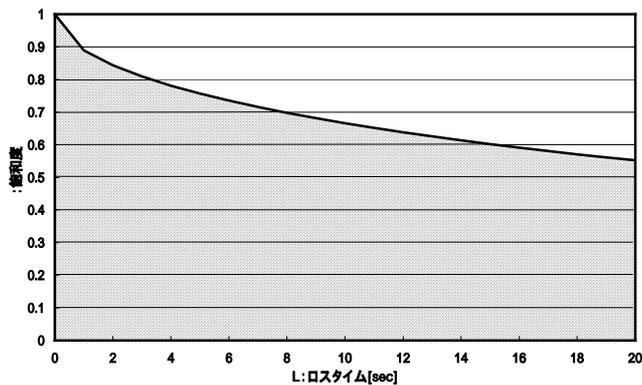


図3 損失時間と飽和度の関係

図は、網掛けで示した状況下で、CO<sub>2</sub> 排出量を最小とする青時間  $g_{emission}$  と  $g_{delay}$  とが異なることを示している。例えば、損失時間が8秒のときは、飽和度が0.7を下回っていれば、 $g_{emission}$  を採用することによって排出量を少なくすることができる。

次に、提案した条件式を用いることができる交通状況を想定し、青時間の違いによって、どの程度のCO<sub>2</sub> 排出量の削減効果があるのかを試算した。なお、削減効果の評価には、CO<sub>2</sub> 排出量と比例の関係にあるガソリン燃料消費量で評価した。想定した交通状況は以下の通りである。

$$\begin{aligned}
 S &= 1800 && [\text{veh} / \text{hour}] \\
 L &= 10 && [\text{sec}] \\
 \mu_0 &= 596 && [m^2 / \text{sec}^2] \\
 \mu_1 &= 694 && [m^2 / \text{sec}^2]
 \end{aligned}$$

このような交通状況下において、排出量最小化と遅れ時間最小化の制御方法が変化する閾値までのガソリン燃料消費量を計算し、その削減率を見た。結果を図4に示す。図より、交通量が比較的少ない状況で、CO<sub>2</sub> 排出量の削減割合が大きいことがわかる。例えば、飽和度が0.2の時に約2%の削減効果があると算出された。また、閾値( = 0.66)を超える交通需要がある場合には、遅れ時間最小化の制御とCO<sub>2</sub> 排出量最小化の制御が一致する。

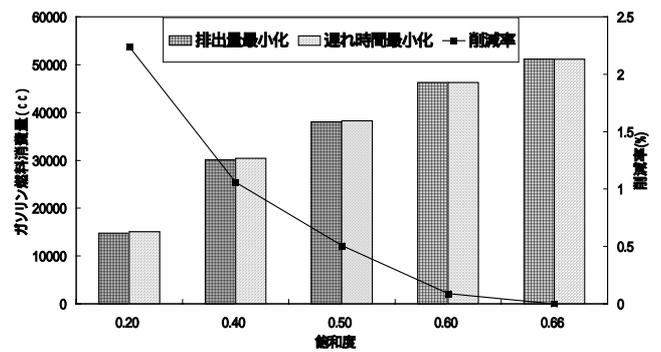


図4 ガソリン燃料消費量削減効果

## 5. おわりに

本研究では、信号制御パラメータを設定する際に、その目的として、遅れ時間を最小化にするのかCO<sub>2</sub> 排出量を最小化にするのかでは、ある交通状況下のものとして設定すべき信号制御パラメータ(サイクル長・スプリット)が異なることを示し、最小化する指標によって信号制御パラメータが異なる状況は、交差点の損失時間・飽和度によって決定されるものであることを確認した。

今後は、

- 1) 車両の到着をランダムにした場合など、より一般的な信号交差点を対象とした分析
  - 2) アイドリングストップを実施した場合におけるCO<sub>2</sub> 排出量削減率の確認
- を行っていく。

## 参考文献

- 1) 吉井稔雄, 片岡源宗, 西内裕晶: 簡易感知器とプローブカーデータを用いた片側交互通行信号制御システムの構築, 第26回土木計画学研究発表会・講演集 No.259, 2002.11
- 2) 大口敬, 片倉正彦, 谷口正明: 都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推計モデル, 土木学会論文集 No.695/ -54, pp125-136, 2002. 1